Análisis de sobretensiones en la red de 150kV del sistema uruguayo, con la estación conversora de frecuencia Rivera- Livramento en servicio

Ing. David Bonjour

***Abstract*—La estación conversora de frecuencia Rivera- Livramento se encuentra instalada en las cercanías de la ciudad de Rivera, y conecta la red de 230kV, 60Hz de Brasil con la red de 150kV, 50Hz de Uruguay. El vínculo con el resto del sistema Uruguayo está constituido por una red esencialmente radial, uniendo la estación de generación Bonete, con las estaciones de Tacuarembó, Manuel Díaz y Rivera.**

El objeto de este estudio es determinar la posibilidad de trabajo con tensión en dicha línea de 150kV, cuando se encuentra en operación la estación conversora inyectando potencia hacia la red de Uruguay (Importación). Se analizarán las sobretensiones producidas frente a determinadas fallas en la red y frente a situaciones anormales de funcionamiento de la conversora de frecuencia.

***Index Terms*— HVDC converters, Overvoltage protection, Power system simulation.**

I. NOMENCLATURA

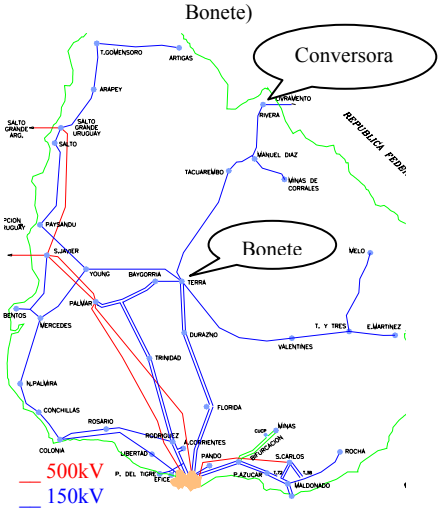
TE, TAC, MDI, RIV: Estaciones de transmisión 150kV Gabriel Terra, Tacuarembó, Manuel Díaz y Rivera.
LIV: Estación de transmisión 230kV Livramento.
CNV: Estación conversora de frecuencia.
RA: Reenganches automáticos en líneas de alta tensión.

II. INTRODUCCION

LA estación convertidora de frecuencia es esencialmente una conexión DC "Back-to-Back" la cual opera a 22kV, tensión de continua.
La estación tiene la característica de poseer una fuerte demanda de potencia reactiva a ambos lados del convertidor, independientemente si se opera en el modo inversor o rectificador. Típicamente esta demanda es del orden del 60% de la potencia activa trasmitida. Por este motivo se dispone de bancos de condensadores, configurados como filtros, para proveer la potencia reactiva necesaria para la operación del convetidor; reduciendo así a niveles bajos la demanda de dicha potencia reactiva, de las redes de potencia de Uruguay o Brasil.
Si la interconexión se bloquea como consecuencia de una falta en el circuito de continua, o si hay una pérdida de la potencia transferida debido a faltas en la red de alterna, entonces habrá un rechazo de carga en ambos lados de la conexión. El rechazo de la potencia reactiva demandada es particularmente importante ya que si los filtros permanecen conectados, inyectarán potencia reactiva a la red AC causando altas sobretensiones transitorias dentro de la estación CNV y en la red AC conectada a ella.

Interesa estudiar las situaciones en las cuales se producen las peores sobretensiones transitorias en el caso de intercambio de potencia entre Uruguay y Brasil a través de la conversora y; concluir si es posible el trabajo con tensión, en cualquiera de los tramos de las líneas de 150kV Terra-Tacuarembó-Rivera-Estación Convertidora, en dichas condiciones. Cuando la potencia transferida a través del convertidor fluye desde Uruguay hacia Brasil, no es relevante incluir el modelado de la estación convertidora en el estudio puesto que ésta quedará aislada al producirse la interrupción del intercambio como consecuencia del bloqueo del convertidor o apertura de uno cualquiera de los tramos de línea de 150kV: TE-TAC-RIV-Estación Convertidora [1]. En cambio, cuando la potencia fluye desde Brasil hacia Uruguay, y ante una apertura en cualquiera de estos tramos de la línea, una parte de la red de AT de Uruguay quedará alimentada desde Brasil a través de la convertidora de frecuencia. En este caso es relevante incluir el modelado de la estación CNV en el análisis.

Fig. 1. Esquema geográfico uruguayo, donde se observa la estación conversora de frecuencia, la red de trasmisión asociada y la central de generación más próxima (Central Bonete)



III. DESCRIPCIÓN Y MODELADO DE LA RED ELÉCTRICA

A. *Estación Conversora*

La estación comprende una conexión "Back-to-Back" [Fig. 2] de dos puentes convertidores de 12 pulsos, de 70MW de capacidad de transferencia en ambas direcciones y está ubicada en el departamento de Rivera, cerca de la frontera con Brasil [Fig. 1].

Fig. 2. Convertidor "back to back"

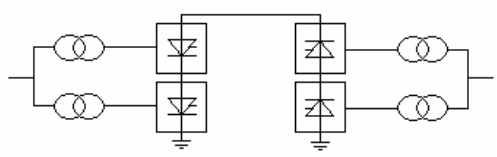
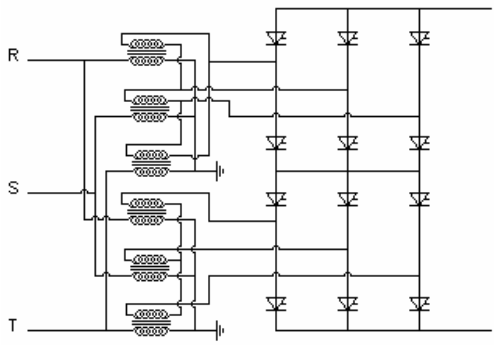


Fig. 3. Puente convertidor de 12 puntos



La conexión interconecta el sistema uruguayo de 150kV, 50Hz con el brasilero de 230kV, 60Hz. Se trata de un convertidor monopolar de tensión y corriente nominal igual a 22kV y 3295 A dc respectivamente, dando una capacidad de transferencia de 72.5MW de potencia continua.

Cada convertidor de 12 pulsos está compuesto por dos puentes en serie de seis válvulas cada uno, alimentadas desde los dos bobinados de baja configurados uno en estrella no aterrada y el otro en triángulo [Fig. 3], (de valores nominales 9.8kV, 46MVA) de un transformador trifásico de cuatro devanados. Entre ambos bobinados hay una diferencia de fase de 30°, con lo cual se cancelan las corrientes armónicas de grado 5 y 7 del lado de alterna y la componente armónica de grado 6 en la tensión de continua del puente.

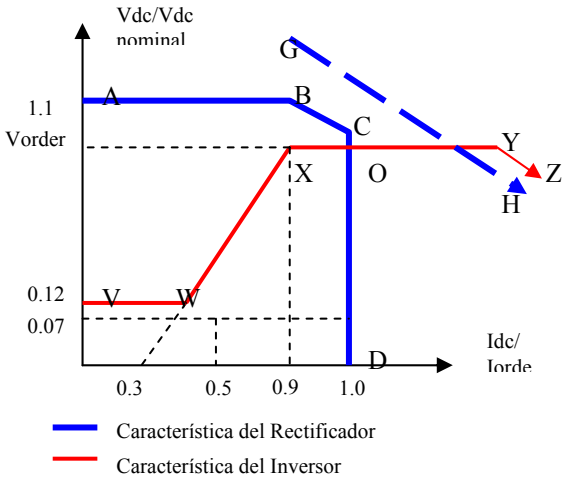
La compensación de potencia reactiva / filtros, del lado Uruguay está compuesta por un filtro de 15.5Mvar alimentado en 150kV y dos filtros de 15.5Mvar, un capacitor de 10Mvar y dos reactores "shunt" de 15.5Mvar alimentados desde el bobinado conectado en estrella de 15.5kV del transformador convertidor de cuatro bobinados de la estación.

La compensación de potencia reactiva, del lado Brasil está compuesta por tres filtros de 20.67Mvar y un reactor "shunt" de 10.33Mvar conectados en el bobinado de 15.5kV del transformador convertidor de cuatro bobinados de la estación.

La transferencia de potencia se mantiene mediante el control de la tensión y corriente continua del convertidor, para lo cual es necesaria una medida periódica de las principales variables involucradas a ambos lados del convertidor. Es decir, corriente y tensión de continua, tensión de alterna, los ángulos de disparo y de extinción ("α" y "γ").

En la siguiente Fig. 4 se observan las características estáticas del rectificador e inversor, las que fueron tenidas en cuenta en el modelado del control de la conversora para las simulaciones realizadas con el programa de transitorios electromagnéticos ATP.

Fig. 4. Características estáticas del convertidor



- Modo de control durante la operación normal:

En condiciones de operación normal, el inversor es el responsable de controlar en un valor constante dado, la tensión de continua Vdc del convertidor. Esto se logra o bien manteniendo constante el ángulo de extinción gama en un valor mínimo o bien, manteniendo constante la tensión de continua Vdc. El primer caso está representado por la curva YZ mostrada en la figura, observándose que la tensión de continua disminuirá ante un aumento en la corriente Idc. El segundo caso está representado por la característica XY, lo cual significa que el ángulo de extinción gama podrá ser mayor que el valor mínimo fijado.
En la misma condición de operación normal, el rectificador es el responsable de controlar en un valor constante dado, la corriente de continua Idc del convertidor; representada en la figura por la curva DC. Esto se logra siempre que el ángulo de retraso alfa no quede limitado a su valor mínimo (curva BC de la misma figura).
La intersección de las características del inversor y del rectificador, será el punto de operación del convertidor (punto OP según la figura).
El punto de operación es alcanzado por la acción de los cambiadores de puntos de los transformadores. El inversor, si está operando en la característica de γ constante (= γ mínimo, es el ángulo de extinción), deberá ajustar la tensión de continua cambiando el "TAP" hasta lograr el valor Vdc deseado. Si por el contrario, está operando en la característica Vdc constante, el cambiador de puntos ajustará el "TAP" hasta lograr el valor deseado de Vdc, con un ángulo γ levemente mayor al mínimo fijado.
Del lado rectificador, el cambiador de puntos del transformador, ajustará el TAP hasta lograr el valor deseado Idc, con un ángulo valor del ángulo de disparo α en el rango adecuado.
Si el inversor está operando en la característica de Vdc constante, en el punto de operación OP, y se produce un aumento en la corriente de continua Idc de manera que el punto de operación se mueva hasta alcanzar el punto Y (con γ= γ mínimo); el inversor cambiará el control a gama mínimo y operará sobre la característica YZ. Así, la tensión Vdc resultará inferior a la deseada y entonces el cambiador de puntos del transformador ajustará el "TAP" hasta restablecer la tensión de continua.

- Margen de Corriente:

El inversor tiene también un control de corriente de continua pero ajustada a un valor algo inferior (en 10%= margen de corriente) a la Idc ordenada por el rectificador. De esta manera el control de corriente del rectificador primará frente al del inversor, y este sólo se activará si el control del lado rectificador es ineficiente debido a que su ángulo de atraso alfa ha llegado a su valor mínimo.
Si la característica BC del rectificador cae por debajo del punto X, el punto de operación OP se desplazará hasta el punto de intersección de las curvas BC con la vertical por X (la característica dada por la de corriente constante disminuída en un 10%: 0.9Idc).
El inversor tomará entonces el control de corriente ajustándola al valor 0.9Idc, mientras el rectificador estará controlando la tensión de continua a través de la característica BC con α= α mínimo.
El control de corriente se transfiere del rectificador al inversor.

- Característica VDCOL:

Si ante un disturbio en el sistema, baja la tensión de alterna, habrá una disminución en la tensión de continua Vdc provocando una fuerte caída en la corriente.
Mediante el control VDCOL ("voltage dependent current order limit") se logra que la corriente de continua disminuya al bajar la tensión, manteniendo así la corriente en un valor mínimo, lo cual facilitará la recuperación del sistema luego del disturbio. La característica esta dada en la figura por la curva XWV.

B. Circuito de detección de isla del convertidor (CID)

La detección de isla del convertidor ocurre cuando abre un interruptor del circuito AC que esta recibiendo potencia desde la estación convertidora, resultando ésta aislada de la generación. Bajo estas condiciones el convertidor continúa alimentando el consumo de potencia de la red ac en la cual la tensión puede ser mantenida contra la resonancia natural de los filtros de la estación. Esta situación causará un rápido aumento de la tensión.
El circuito de detección de isla del convertidor tiene dos detectores, uno basado en la detección de sobretensión y la otra en la de sobrefrecuencia del sistema de alterna AC.
Si la medida de voltaje AC excede una tensión de referencia dada, se fuerza a los controles del lado inversor a disparar las válvulas con un ángulo de disparo mínimo (igual a 2° durante 50ms); éste es el llamado "Enforced Rectification Mode" (ERM). Este modo de operación reducirá la tensión AC a cero, la cual permanecerá en ese valor hasta que finalice la condición de isla del convertidor.
Inmediatamente luego de los 50ms en que se mantiene la condición ERM, se impone la condición "bypass pair". Esta condición es

removida cuando la tensión AC supera el valor 0.75pu.
Si la condición de isla del convertidor causa una sobrefrecuencia pero no un valor excesivo de voltaje, operará el detector de sobrefrecuencia.
La detección de isla del convertidor sólo opera en el lado inversor y es deshabilitado durante la rectificación o cuando el convertidor está bloqueado.

C. Modelado

El modelado de la estación conversora de frecuencia se realizó en ATPDraw incluyéndose:

Modelo con componentes TACs de:
- El puente convertidor.
- Medida de los ángulos de disparo a los tiristores.
- Cálculo de las señales de error y lazos de control de disparo a los tiristores.
- Protección de detección de isla del convertidor, CID.

Modelado con rutinas Models de:
- Los circuitos de disparo a los tiristores.

El modelado de la red a ambos lados de la estación CNV incluye [Fig. 5]:

Lado Uruguay:
- Transformador de 4 devanados de la estación.
- Compensación de potencia reactiva existente.

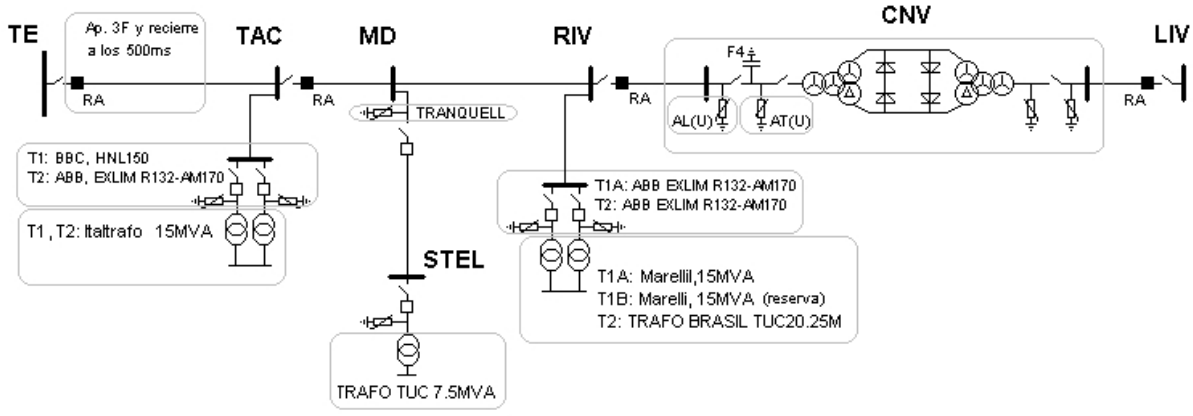
Lado Brasil:
- Transformador de 4 devanados de la estación.
- Compensación de potencia reactiva existente.

D. Red de Trasmisión

En la Fig. 5, se muestra una representación esquemática de la red de AT modelada en detalle la cual incluye:

1. Los tramos de línea de 150kV entre las estaciones de Terra- Tacuarembó- Manuel Díaz- Rivera- Estación Conversora y el tramo Manuel Díaz- Stel.
2. Los transformadores de AT/ BT en las estaciones Tacuarembó, Stel, y Rivera.
3. Ambos transformadores de cuatro devanados de la estación convertidora.
4. Los descargadores en 150kV instalados en Tacuarembó, Manuel Díaz, Rivera y en la Estación Convertidora.
5. Los recierres habilitados marcados como "RA": Terra-Tacuarembó, Tacuarembó- Rivera y Rivera- Estación Convertidota, siendo la apertura trifásica y recierre a los 500ms.

Fig. 5. Red de 150kV de Uruguay modelada con detalle



El resto del sistema uruguayo y el sistema brasilero no constituyen una parte relevante del sistema a considerar y fueron modelados circuitos equivalentes para su representación.
En cuanto a las cargas de la red de AT comprendida entre las estaciones de Terra y la estación conversora, se consideraron las correspondientes a un régimen de mínima demanda.

IV. ANÁLISIS

Para el análisis del comportamiento de régimen permanente se analizaron las peores condiciones de intercambio Brasil hacia Uruguay consideradas posibles para el control de tensión en el SIN. Se consideró un caso de mínima demanda y máxima importación desde Brasil.
El procedimiento empleado consistió en realizar inicialmente simulaciones de flujo de carga para determinar la condición de máximo intercambio de potencia activa desde Brasil hacia Uruguay.

Para los estudios de comportamiento transitorio se consideró el sistema eléctrico nacional previo a la salida de la conversora y en la peor condición definida antes.
Este análisis se realizó con el programa ATP con simulaciones determinísticas de 0.3 segundos, de los peores casos seleccionados con el objeto de visualizar formas de onda resultantes durante la salida intempestiva de alguno de los tramos de Terra-Tacuarembó, Tacuarembó-Rivera o Rivera- Conversora. Se consideraron casos con y sin falta.
Para representar las peores condiciones, respecto a las sobretensiones que pueden ocurrir en la línea TE-CRI se consideró el caso correspondiente a la apertura en cualquiera de los tramos CRI - RIV, RIV - TAC o TAC - BON dado que en estas condiciones la conversora queda trabajando por un período de tiempo, hasta que la protección de detección de isla lo detecta.

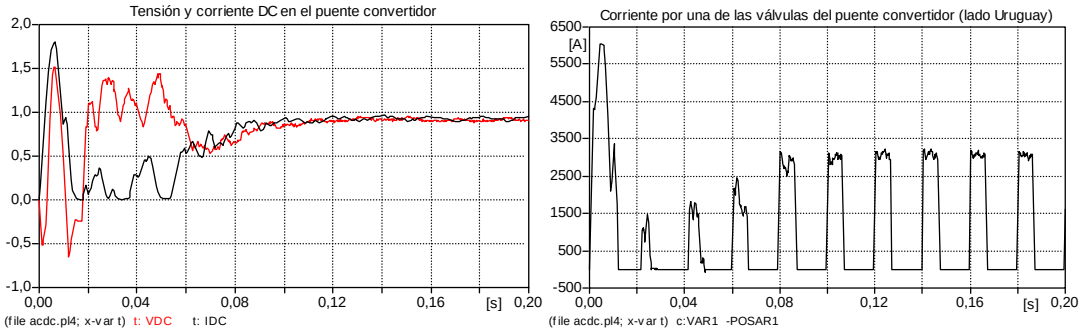
Nota:
La estación tiene la característica de poseer una fuerte demanda de potencia reactiva a ambos lados del convertidor, independientemente si se opera en el modo inversor o rectificador. Típicamente esta demanda es del orden del 60% de la potencia activa trasmitida. Por este motivo se dispone de bancos de condensadores, configurados como filtros, para proveer la potencia reactiva necesaria para la operación del convetidor; reduciendo así a niveles bajos la demanda de dicha potencia reactiva, de las redes de potencia de Uruguay o Brasil.
Si la interconexión se bloquea como consecuencia de una falta en el circuito de continua, o si hay una pérdida de la potencia transferida debido a faltas en la red de alterna, entonces habrá un rechazo de carga en ambos lados de la conexión. El rechazo de la potencia reactiva demandada es particularmente importante ya que si los filtros permanecen conectados, inyectarán potencia reactiva a la red AC causando altas sobretensiones transitorias dentro de la estación convertidora y en la red AC conectada a ella.
El caso estudiado en el presente trabajo corresponde a una transferencia de potencia que fluye desde Brasil hacia Uruguay. Ante una apertura en cualquiera de estos tramos de la línea, una parte de la red de AT de Uruguay quedará alimentada desde Brasil a través de la convertidora de frecuencia. En este caso fue relevante incluir el modelado de la estación convertidora en el análisis así como también el modelado de la protección de detección de isla, llamada “CID”.

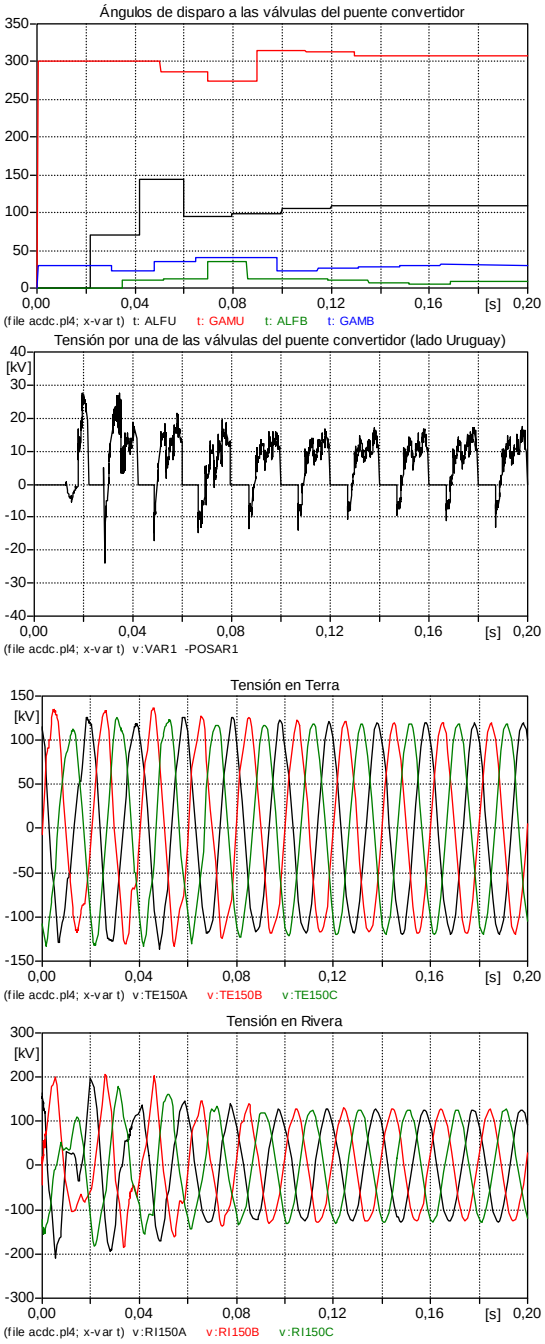
V. RESUTADOS

A. Régimen permanente

El caso se estudió para una condición de funcionamiento de la conversora con Vdc= 0.95pu, Idc=0.9 pu (aproximadamente 60MW AC) y tres filtros capacitares en servicio del lado Uruguay. La tensión regulada en Rivera 150kV es de 1.04pu. En el grupo de Figs. 6, se pueden observar representaciones gráficas (incluyendo el transitorio inicial correspondiente al ajuste de las condiciones iniciales) de las formas de ondas correspondientes a la tensión, corriente continua del convertidor, ángulos de disparo de las válvulas, tensiones en Terra, y Rivera en barras de 150kV, en condición de régimen.

Figs. 6. Representaciones gráficas de variables en condición de régimen previo a la perturbación.




Ángulos de disparo a las válvulas del puente convertidor
(file acdc.pl4; x-var t) t: ALFU t: GAMU t: ALFB t: GAMB
Tensión por una de las válvulas del puente convertidor (lado Uruguay)
[kV]
(file acdc.pl4; x-var t) v:VAR1 -POSAR1
Tensión en Terra
[kV]
(file acdc.pl4; x-var t) v:TE150A v:TE150B v:TE150C
Tensión en Rivera
[kV]
(file acdc.pl4; x-var t) v:RI150A v:RI150B v:RI150C
[s]

B. Régimen transitorio

A partir de esta situación de operación de la red, se realizaron simulaciones determinísticas en ATP considerando la salida intempestiva sin falta en uno cualquiera de los tramos de la línea Terra- Rivera, determinándose las mayores superaciones producidas (en el radial TE-TA-MDZ-STL-RIV). Se analizaron además casos con falta 1FT luego de la salida de la línea, en el instante en que se produce la mayor sobretensión.
Los casos con falta en la línea Terra- Rivera anterior a la salida intempestiva de cualquiera de los tramos indicados, no se consideran importantes puesto que la misma falta provocaría la pérdida del control de disparo de las válvulas de la conversora causando una inmediata caída de de la tensión en el circuito de AT.
Los resultados más relevantes se muestran en la TABLA I y en las Figs. 8 para el caso nombrado C1de la misma tabla.
De acuerdo a los resultados, se observa lo siguiente:
Las sobretensiones producidas en cualquiera de los tramos de línea TE-TA-MDI-STL-RIV son inferiores a los máximos permitidos para el trabajo con tensión, incluso sin considerar en el modelado del sistema, los descargadores instalados en AT.
Las sobretensiones producidas en el tramo de línea Rivera-Estación Conversora, sin considerar en el modelado del sistema los descargadores instalados en AT, son superiores a los máximos permitidos para el trabajo con tensión. Por el contrario si se los incluye en el modelado del sistema, se obtienen valores de sobretensiones algo inferiores a las máximas permitidas. En este caso, la energía consumida por los descargadores instalados en barras de 150kV en la estación conversora es de aproximadamente 350kJ, lo cual esta por debajo del valor máximo soportado por ellos (544kJ). Las sobretensiones una fase tierra producidas son también inferiores a las máximas permitidas de acuerdo a las características de protección contra sobretensión de los descargadores (TOV), las que establecen 1.79pu a los 100ms (para una fase tierra).

Por último se simuló, a título ilustrativo, la apertura del interruptor en Terra sin actuación de la protección CID y rotura por explosión de los descargadores en Rivera a los 0.4s debida a un exceso de energía consumida por ellos (simulada abriendo a los 0.4s una llave temporizada que los conecta a la barra de 150kV en Rivera), [ver Figs. 7]. No se observa en este caso sobretensiones mayores a las encontradas en el caso C3 de la TABLA I. Es decir, las sobretensiones que se producen luego de la desconexión de los descargadores son inferiores a aquellas obtenidas en las simulaciones que no incluyen en ningún momento, el modelado de los mismos.
Se observa además, en la representación gráfica correspondiente a la "tensión en Terra a ambos lados del interruptor, Fase A", que se produce un aumento en la frecuencia del sistema alimentado desde la conversora y aislado de UTE. Dicha frecuencia es la oscilación natural del sistema compuesto por los capacitares, reactores y la red radial alimentada por la conversora hasta el extremo en Terra de la línea objeto de estudio, la cual tiene en este caso el valor de 58.8Hz aproximadamente. Esta condición es también detectada por la protección CID, de acuerdo a como se explicó anteriormente.

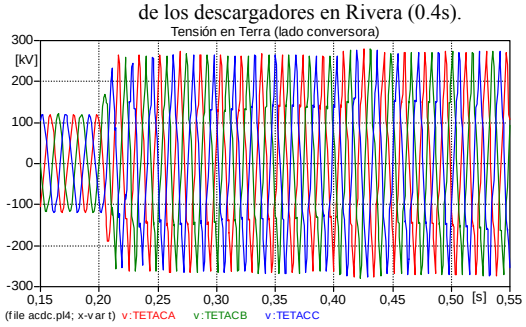
TABLA I
SOBRETENSIONES EN EL RADIAL TE-TAC-CRI

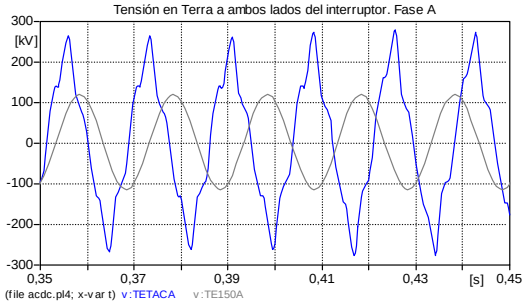
Caso	*Descripción*	*Modelado de Descargadores*	*Falta*	*Tensión máxima en 150kV [pu] (base= 122.47kV)*				
				Interruptor	*TE*	*TAC*	*MDI & STL*	*RIV*
C1	Importación desde Brasil: 60MW Apertura de interruptor en RIVERA a los 0.2s. Se modeló la protección CID.	No	No	4.55	-	-	-	3.67 / ***1.21***
C1-d	Importación desde Brasil: 60MW Apertura de interruptor en RIVERA a los 0.2s. Se modeló la protección CID.	En CONV: ALU, ATU	No	3.11	-	-	-	2.20
C2	Importación desde Brasil: 60MW Apertura de interruptor en TACUAREMBÓ a los 0.2s. Se modeló la protección CID.	No	No	2.92	-	2.33 / ***1.15***	2.32 & 2.30	2.24
C2-1FT	Importación desde Brasil: 60MW Apertura de interruptor en TACUAREMBÓ a los 0.2s. Se modeló la protección CID.	No	No	3.16	-	2.76	2.58 & 2.54	2.44
C2-d-1FT	Importación desde Brasil: 60MW Apertura de interruptor en TACUAREMBÓ a los 0.2s. Se modeló la protección CID.	En CONV: ALU, ATU En RIV: EXLIMR	1FT en TAC (lado CONV) luego de la apertura de la LT	3.25	-	2.35	2.20 & 2.27	2.00
C3	Importación desde Brasil: 60MW Apertura de interruptor en TERRA a los 0.2s. Se modeló la protección CID.	No	No	3.04	2.28 / ***1.03***	2.14	2.05 & 2.04	2.13

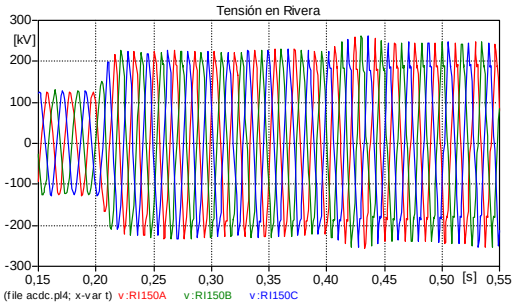
Observación: Los valores con formato "azul cursiva" corresponden a las sobretensiones producidas del lado de Terra. Los demás valores corresponden a los obtenidos del lado de la conversora (donde se producen las sobretensiones más importantes).

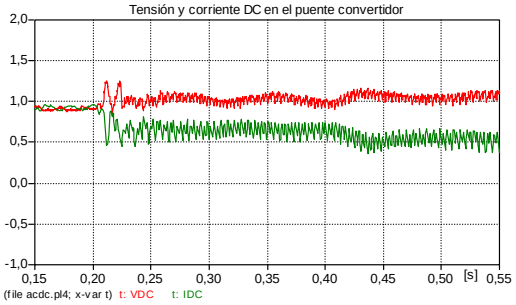
1) Casos sin modelado de la protección CID:

Figs. 7 Apertura del interruptor en Terra (0.2s) + Rotura "por explosión" de los descargadores en Rivera (0.4s).



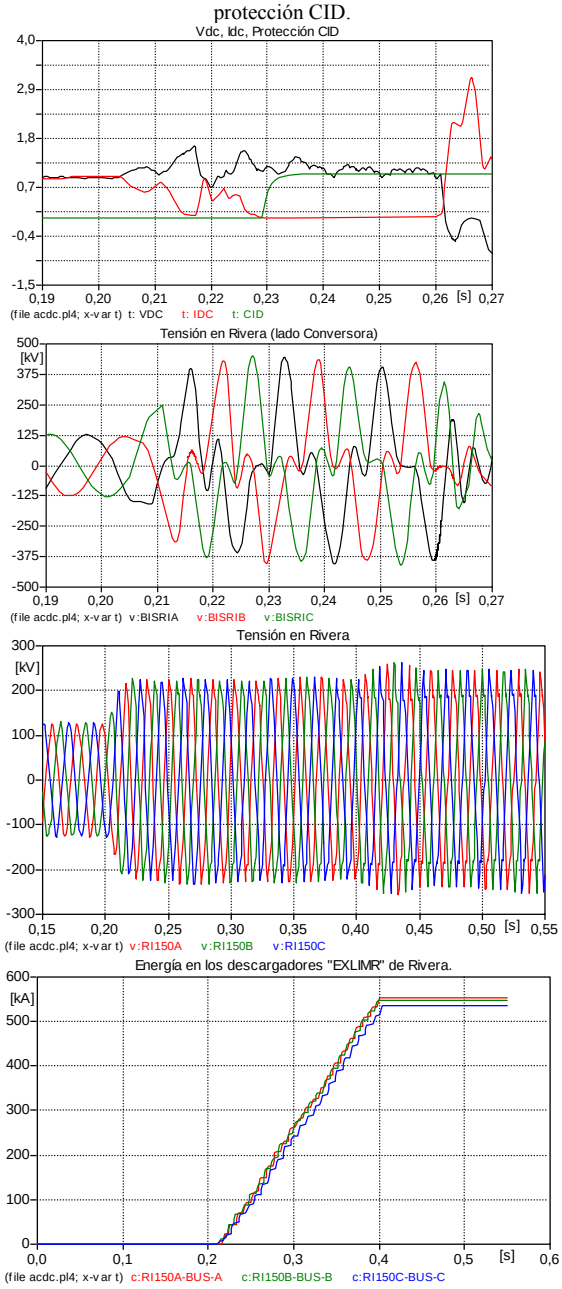






2) Casos con modelado de la protección CID:

Figs. 8 C1 Apertura del interruptor en Rivera (0.2s) y actuación de la protección CID.



VI. Conclusión

De acuerdo con el análisis de sobretensiones realizado, se concluye que es posible el trabajo con tensión en cualquiera de los tramos TE-TA-MDI-STL-RIVERA sin incluir el tramo de línea Rivera- Estación Conversora.

Los casos analizados permiten observar el comportamiento del sistema frente a determinadas fallas en la red, y la influencia en las sobretenciones producidas, de las principales protecciones instaladas (descargadores y protección CID).

VII. References

Periodicals:

[1] Informe IN-PEE-ERE-0404-v00 - Análisis de TCT en la línea Terra-Tacuarembó-Stel-Rivera; David Bonjour

[2] G. Calzolari, M. Artenstein, A. Segade, F. Rabin, "Modeling of the back-to-back converter between Uruguay and Brasil in A.T.P.

[3] Cálculo de distancias de segurança para manutençao en linha viva.

[4] Dennis A. Woodford, "HVDC Transmission"

[5] Vijay K. Sood, HVDC AND TACTS CONTROLLERS. Aplications of Static Converters in Power Systems.]

[6] D. Castagna, M. Croce, C. Nieto, Modelado en EMTDC, Diagramas de bloques de la estación conversora, UTE, Uruguay.

[7] IN-PEE-ERE-0506-v00 - Análisis de TCT en la línea Terra-Tacuarembó-Rivera para casos con importación desde Brasil; David Bonjour

Technical Reports:

[8] ALSTOM, ENGINEERING REPORTS, entre otros: Report No.: PES b 1192, 1248, 1198, 1164, 1170, 1167, estudios RTDS, etc.

VIII. Biografía

David Bonjour nació en la ciudad de Trinidad en la República Oriental del Uruguay el 17 de junio de 1964. Fue graduado como Ingeniero Electricista en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Su especial área de interés de trabajo incluye estudios de transitorios electromagnéticos (TEMG) y electromecánicos (TEMC), incluyendo el desarrollo y modelado de los equipos de trasmisión y generación asociados, desempañándose desde el año 1994 en el departamento de Estudios Dinámicos de la Red de Trasmisión de UTE, Uruguay.